

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Механіко-машинобудівний інститут

Магістерська робота на тему:
«ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛМАЗНОГО ДОВЕДЕННЯ
КЕРАМІЧНИХ КУЛЬ З КАРБІДУ БОРУ»

Виконав студент групи МТ-82МП

Федько В.О.

Керівник дипломної роботи

Сохань С. В.

Київ-2019

УДК 621.9.025.77:615.46:616.728

Федько, В.О. Дослідження ефективності алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору : магістерська дис. : 131 Прикладна механіка, Технології машинобудування / Федько Владислав Олександрович. – Київ, 2019. – 47 с.

РЕФЕРАТ

Структура та об'єм роботи. У магістерську дисертацію входить вступ, 5 розділів, загальні висновки, список використаної літератури. Робота складається з 47 сторінок тексту, 19 таблиць, 7 рисунків, 27 літературних джерел.

Актуальність теми. У багатьох галузях промисловості експлуатуються в значній кількості підшипники кочення, насоси, гідродвигуни й інші пристрої і механізми, ресурс і надійність роботи яких в основному визначається працездатністю і якістю виготовлення деталей типу "куля". Кулі в цей час переважно виготовляються зі сталі й вони відносно швидко відмовляють в умовах високих навантажень, температур, а також інтенсивних абразивного, корозійного, хімічного й іншого видів зношування. Заміна сталевих куль на керамічні в багатьох випадках дозволяє досягти більш високих експлуатаційних показників і розширити область функціональних можливостей пристроїв, у яких вони застосовуються.

Мета й завдання дослідження. Вивчити вплив режиму обробки на процес алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору.

Об'єкт дослідження. Алмазне доведення керамічних куль з карбіду бору.

Предмет дослідження. Вплив режиму обробки на процес доведення керамічних куль з карбіду бору.

Методи дослідження. Аналіз раніше опублікованих робіт. Проведення експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів. Для виокремлення частки, обумовленої саме впливом режиму обробки застосовано метод графічної

апроксимації змінювання у часі середніх значень показників точності у партії куль. Встановлено, що виокремлені частки можуть змінюватися як у бік зростання, так і бік зниження в залежності від значень параметрів режиму обробки, як-от: сила притиснення доводчого диску, час обробки куль між подачею алмазної суспензії і основа алмазної суспензії (масло або вода). В результаті проведення повного факторного експерименту типу 2^3 визначено вплив кожного з факторів й найбільш ефективно для виправлення відхилення від сферичної форми і зменшення різномірності діаметру куль у партії поєднання досліджуваних факторів.

Практичне значення отриманих результатів. Визначено найбільш ефективно для виправлення відхилення від сферичної форми і зменшення різномірності діаметру куль у партії поєднання досліджуваних факторів, а саме: слід зменшувати силу притиснення до 100Н і час між подачами суспензії до 30 хвилин за обов'язкового використання алмазної суспензії на основі масла.

Апробація результатів дисертації та публікації. Матеріали дисертації було представлено на науковій конференції «Інновації молоді в машинобудуванні», на основі результатів цієї конференції робота була опублікована в збірці праць «Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів» / за заг. ред. Данильченка Ю.М., д-ра техн. наук., проф. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – № 1. – 443 с.

Ключові слова: керамічні кулі з карбіду бору, алмазне доведення, сила притиснення доводчого диску, час обробки куль між подачею суспензії, основа алмазної суспензії, діаметр і відхилення від сферичної форми куль, різномірність діаметру куль у партії.

ABSTRACT

Structure and scope of work. The master's thesis includes an introduction, 5 sections, general conclusions, a list of used literature. The work consists of 47 pages of text, 19 tables, 7 drawings, 26 literary sources.

Actuality of theme. In many industries large numbers of rolling bearings, pumps, hydraulic motors and other devices and mechanisms are used, whose life and reliability are mainly determined by the efficiency and quality of the production of ball-type parts. At this time, the balls are mainly made of steel and they are relatively quick to refuse under conditions of high loads, temperatures, as well as intense abrasive, corrosion, chemical and other types of wear. Replacing steel balls with ceramic in many cases allows to achieve higher performance and extend the functionality of the devices in which they are used.

The purpose and objectives of the study. Study of the influence of the treatment regime on the process of diamond finishing of ceramic balls made of boron carbide.

Object of study. Diamond finishing of ceramic balls made of boron carbide.

Subject of study. The influence of the treatment mode on the process of bringing ceramic balls of boron carbide.

Research methods. Analysis of previously published works. Conducting experiments.

Scientific novelty of the obtained results. To isolate the particle due to the influence of the processing mode, the method of graphical approximation of time averaging of accuracy values in a batch of balls was applied. It is established that the separated particles can change both in the direction of growth and in the direction of decrease depending on the values of the parameters of the processing

mode, such as the force of pressing of the reference disk, the time of processing of balls between the filing of the diamond suspension and the basis of the diamond suspension (oil or water). As a result of conducting a full factor experiment of type 23, the most effective one for correcting the deviation from the spherical shape and reducing the diversity of the diameter of the balls in the batch of combination of the studied factors was determined.

The practical significance of the results obtained. Determined to be the most effective for correcting the deviation from the spherical shape and reducing the size of the diameter of the balls in the batch of factors studied, namely: to reduce the compression force to 100H and the time between feedings of the suspension to 30 minutes with the mandatory use of a diamond suspension based on oil.

Testing the results of the thesis and publication. The dissertation materials were presented at the scientific conference "Innovations of youth in mechanical engineering", based on the results of this conference the paper was published in the collection of works "International scientific and technical conference of young scientists and students" / for the total. ed. Danilchenko Yu.M., Doctor of Engineering. Professor, prof. - Kyiv: KPI them. Igor Sikorsky, 2019. - № 1. - 443 p.

Keywords: ceramic balls made of boron carbide, diamond finishing, clamping force of the finishing disk, processing time of the balls between the slurry supply, the basis of the diamond suspension, diameter and deviation from the spherical shape of the balls, the size of the diameter of the balls in the batch.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ «КУЛЯ».....	8
1.1. Процеси алмазно-абразивної обробки деталей типу "куля"	8
1.2. Особливості обробки куль з кераміки.....	13
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	18
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	24
РОЗДІЛ 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ	30
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	33
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	44
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	45

ВСТУП

У багатьох галузях промисловості експлуатуються в значній кількості підшипники кочення, насоси, гідродвигуни й інші пристрої і механізми, ресурс і надійність роботи яких в основному визначається працездатністю і якістю виготовлення деталей типу "куля". Кулі в цей час переважно виготовляються зі сталі й вони відносно швидко відмовляють в умовах високих навантажень, температур, а також інтенсивних абразивного, корозійного, хімічного й іншого видів зношування. Заміна сталевих куль на керамічні в багатьох випадках дозволяє досягти більш високих експлуатаційних показників і розширити область функціональних можливостей пристроїв, у яких вони застосовуються. Завдяки поєднанню унікальних властивостей підшипникових сталей й чудових властивостей кераміки забезпечуються різноманітні високі експлуатаційні якості гібридних підшипників – високу корозійну й термічну стійкість та стійкість проти втомного тріщиноутворення.

Метою дослідження є вивчення впливу режиму обробки на процес алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору, який характеризували такими показниками: швидкість зменшення діаметру кулі, швидкість змінювання форми поверхні кулі та різнорозмірність діаметрів куль у партії.

Об'єктом дослідження буде слугувати алмазне доведення керамічних куль з карбіду бору.

Предметом дослідження, в свою чергу, будуть режими доведення керамічних куль з карбіду бору.

В результаті експериментального дослідження впливу режиму обробки на показники алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору було визначене найбільш ефективні поєднання досліджуваних факторів з точки

зору одночасного зменшення і відхилення від сферичної форми куль, і різнорозмірності діаметру куль у партії.

РОЗДІЛ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Процеси алмазно-абразивної обробки деталей типу "куля"

Вимоги до якості і точності виготовлення сферичних тіл і все більш широке використання для їх виготовлення сучасних матеріалів стимулюють значну кількість розробок нових методів обробки, що забезпечують підвищення продуктивності і зменшення енерговитрат процесу прецизійної обробки, зниження металоємності і вартості спеціалізованого технологічного обладнання [1, 2, 3].

Технологічні процеси обробки куль мають свої особливості. Вони визначаються тим, що куля має єдину сферичну поверхню, яка оформляє деталь і поєднує головну робочу і основну базову поверхні. У більшості випадків деталі типу «куля» обробляються порівняно великими партіями. Вся гамма технологічних операцій точної обробки куль будується на методі бесцентрової обробки, при якому цілком і безперервно задовольняється принцип суміщення основної службової, технологічної та контрольної баз. Заготівкам надається первинна куляста форма, а потім, поступово уточнюючи її, прагнуть отримати форму ідеальної кулі при поступовому зменшенні шорсткості [4].

Більшість існуючих технологічних процесів абразивної обробки куль можна згрупувати в такі типові варіанти:

1. Обробка куль, що знаходяться в підвішеному стані, - рис. 1.1, а (попередня обробка, а також обробка деталей з низькими вимогами до точності і шорсткості).

2. Обробка куль із закріпленою віссю обертання - рис. 1.1,6 (обробка неповних сферичних поверхонь).

3. З м'яким силовим замиканням положення оброблюваних куль:

- замикання під дією відцентрових сил - рис. 1.1, в, (попередня обробка, а також обробка деталей з низькими вимогами до точності і шорсткості);
- замикання потоком рідини або газу - рис. 1.1, г (як правило, остаточна обробка та полірування куль з порівняно м'яких матеріалів).

4. З жорстким силовим замиканням:

- обробка куль інструментами з непаралельно розміщеними осями - рис. 1.1, д (обробка великих куль);
- обробка куль інструментами з паралельними осями обертання - рис. 1.1, е;
- обробка куль інструментами з співісними осями обертання - рис. 1.1, ж;
- обробка куль між двома дисками - рис. 1.1, з (базовий, найбільш поширений спосіб прецизійного доведення і шліфування).

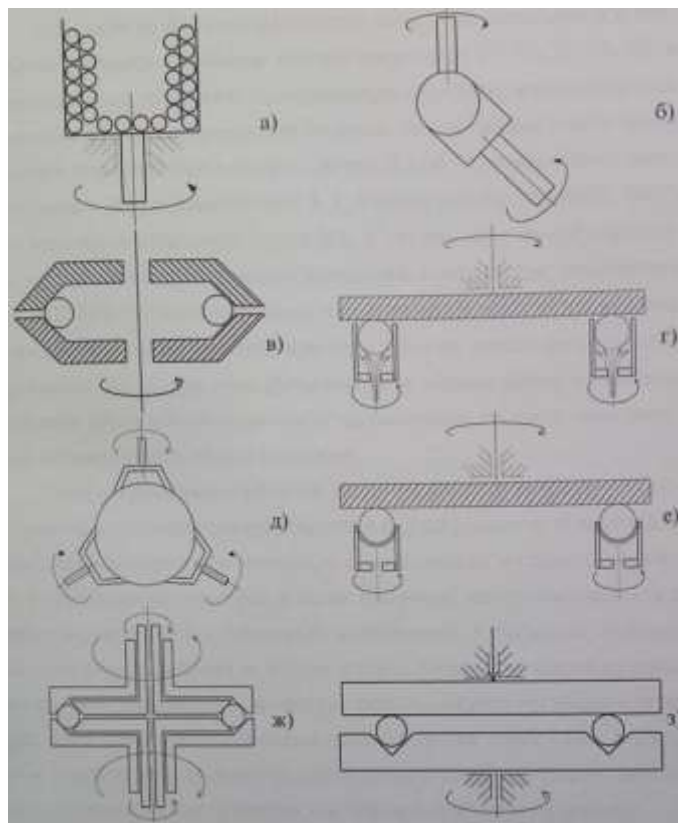


Рис. 1.1 Схеми обробки куль:

а) в підвішеному стані; б) із закріпленою віссю обертання; в) з м'яким силовим замиканням відцентровими силами; г) з м'яким силовим замиканням потоком рідини або газу; д) інструментами з непаралельно розташованими осями; е) з інструментами з паралельними осями обертання; ж) інструментами, розташованими співвісно; з) між двома дисками.

Незважаючи на велику кількість патентних матеріалів і розробок в області обробки деталей типу "куль" [5, 6, 7, 8, 9], в промислових масштабах прецизійну обробку в переважній більшості випадків роблять за схемою обкатки куль між двома дисками («традиційна схема», див. рис. 1.1, з). Ця схема була запатентована в 1885 році американцем В. Г. Райтом (патент № 566678, E11P) для бесцентровообкатного верстата [2]. З тих пір цей спосіб обробки, що не зазнав суттєвих змін, застосовується всюди [10, 11]. Обробка (шліфування або доведення) ведеться шляхом кочення куль між двома дисками, при цьому один з дисків (рідше - обидва) обертається. Кулі при цьому розташовані в направляючих кільцевих канавках зазвичай У-образного або напівкруглого профілю, виконаних на поверхні одного з дисків.

При шліфуванні як диска без канавки використовується абразивний круг, а доведення проводиться в середовищі доводочної пасти [2]. Матеріал притирів при доведенні, в залежності від матеріалу абразиву і оброблюваних куль, а також необхідної продуктивності і якості, варіюють в різних комбінаціях в широкому діапазоні - від фетру та повсті до чавуну і сталі. Обробку куль зі сталі і кераміки, як правило, проводять з використанням чавунних притирів. При елеваторній обробці один з дисків має вікно, в якому розташовується пристрій для завантаження і розвантаження куль, пов'язане з елеватором або бункером, в якому кулі перемішуються.

Цей спосіб обробки простий в реалізації і дозволяє досягти стабільних і досить високих якісних показників. Проте, йому притаманний ряд недоліків, які особливо проявляються при обробці керамічних матеріалів, перш за все, внаслідок їх високої твердості:

- низька продуктивність;

- недостатня стійкість доводочних дисків;
- нерівномірна сітка слідів обробки на поверхні кулі;
- різнорозмірними по діаметру в партії оброблених куль, особливо при безелеваторной обробці;
- великі відмінності умов обробки для напрямних канавок, розташованих на різних відстанях від центру дисків, що обумовлено, в першу чергу, різницею лінійних швидкостей. Як наслідок, для доведення куль на різних канавках характерні різні якості оброблення, зносу інструменту і витрат доводочної пасти.

Кінематична особливість традиційного методу обробки - низькі швидкості проковзування в зонах контакту [12, 13]. Їх величиною можна управляти тільки шляхом зміни частоти обертання ведучого диска, діапазон варіювання якої може обмежувати шародоводочних верстатів в межах 30 ... 120 об / хв [14]. Крім того, збільшення частоти обертання ведучого диску вище певного значення (близько 80 об / хв) призводить до таких явищ, як викидання доводочної пасти із зони обробки і поява вібрацій, що збільшує витрату алмазів і знижує якість обробки. Реальна середня швидкість проковзування між поверхнями кулі і дисків в зоні контакту при обробці за стандартною схемою в більшості випадків не перевищує 2 м / хв.

Під час обробки за традиційною схемою кулі обертаються навколо власної осі обертання, яка нахилена. Величина кута нахилу осі α визначається діаметром канавки, діаметром кулі і положенням точок контакту кулі з дисками.

За час одноразового пробігу між дисками куля в залежності від його діаметра здійснює близько 20 ... 500 обертів навколо власної осі. При цьому обробляється невелика частина поверхні кулі. Кожна з трьох зон контакту (рис. 1.2) залишає на поверхні кулі слід у вигляді досить вузьких кіл, перпендикулярних до власної осі обертання кулі [12]. Положення власної осі обертання кулі (величини кута її нахилу α) змінюється тільки в результаті випадкових факторів: мінливості одиничного діаметра куль, кінцевою

точності доводочних дисків і їх вібрації в процесі обробки, многоточечного контакту і ін. [15]. Виникає гіроскопічний момент внаслідок малих швидкостей і незначної маси кулі значно менше суми моментів тертя кулі об доводочні диски і тому не впливає на положення осі обертання 00 [2, 15]. При прецизійному доведенні вплив перерахованих факторів істотно знижується. Тому за час однократного контакту кулі з дисками кут нахилу осі власного обертання кулі практично не змінюється.

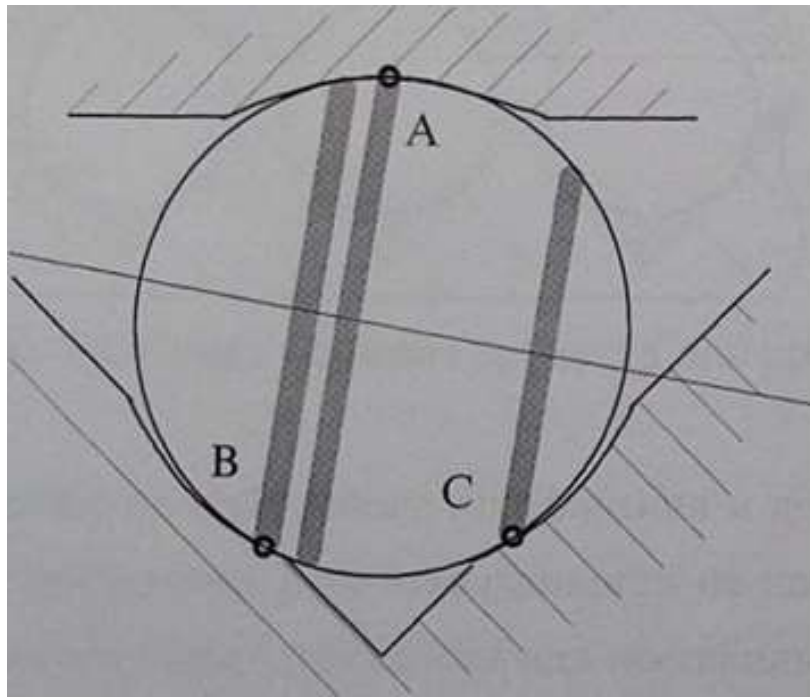


Рис. 1.2. Следы обработки за период однократного пробега шара между дисками.

Таким чином, на поверхні що формується не утворюється рівномірна сітка слідів обробки і для досягнення високої якості кількість пробігів кулі між дисками має бути порівняно велике. Сумарний час прецизійної обробки партії кулі з кераміки вимірюється десятками годин.

Інші схеми прецизійного шліфування і доведення широкого практичного застосування в промисловості не отримали, як правило, через конструктивні складності або нестабільності їх роботи [16, 17, 2]. Слід також зазначити, що, незважаючи на велику кількість і різноманітність схем, всі вони вирішують завдання підвищення продуктивності і якості обробки в порівнянні з обробкою «класичним» способом за допомогою збільшення

швидкості шліфування (доведення) і додання кулях під час обробки складнообертового руху (багатовісного обертання). Зазвичай це завдання вирішується або шляхом ускладнення конструкції інструменту і введення додаткових функціональних вузлів, або шляхом істотного ускладнення кінематики верстатів, що робить проблематичним використання існуючого верстатного парку. Цим методам обробки також притаманний ряд недоліків.

Так, наприклад, запропонований в [16] спосіб обробки реалізує контакт інструменту із заготовлею по площі кінцевих розмірів і дозволяє значно підвищити продуктивність і якість обробки, в тому числі неметалічних куль. Однак, пристрій для його реалізації має досить складну кінематичну схему. Крім того, для кожного з оброблюваних виробів існують незалежні розмірозадаючі кінематичні ланцюги, що робить неможливим оброблення партії деталей з високими вимогами до їх різнорозмірності.

Деякі з відомих методів обробки куль, що базуються на зміні положення точок їх контакту з доводочними дисками за рахунок несиметричного профілю напрямної канавки або кільцевої проточки на притискному диску [16], характеризуються, з одного боку, легкістю і простотою реалізації в промисловості, що вимагає незначної модернізації існуючого устаткування, а, з іншого, - недостатнім збільшенням ефективності обробки в порівнянні з традиційним способом.

1.2. Особливості обробки куль з кераміки

Відомо безліч різних технічних рішень в області обробки деталей типу "куля", в тому числі скляних, корундових, твердосплавних [18, 19, 20, 10, 21, 67]. Однак, всі ці рішення характеризуються низькою ефективністю при прецизійній обробки куль з конструкційної кераміки, такій як карбід кремнію, і особливо кераміки на основі карбіду бору [20, 22].

Це викликано, перш за все, дуже високою твердістю зазначених матеріалів, внаслідок чого продуктивність їх обробки низька і, відповідно,

тривалість процесу прецизійної обробки велика (90 ... 120 год), а витрата алмазів і знос оснащення досить високі.

Ефективна прецизійна обробка деталей типу "куля" з сучасної конструкційної кераміки в зв'язку з їх високою твердістю можлива тільки при використанні як абразив доводочної пасти алмазів. При цьому прийнятною продуктивності поки не вдавалося отримати навіть при максимальних режимах обробки (без дотримання вимог до якості обробки) з використанням доводочної пасти з високою концентрацією алмазів порівняно великої зернистості.

При обробці більш пластичних матеріалів, наприклад, металів, в процесі формування сферичної поверхні досить велика частка належить пластичній деформації, що сприяє як поліпшенню форми (зменшення відхилення від сферичної форми), так і зниження шорсткості поверхні [4]. При обробці конструкційної кераміки роль пластичної деформації в процесі формоутворення, очевидно, мала.

Слід також враховувати особливості класичного способу доведення куль методом обкатки між двома дисками при обробці невеликих партій керамічних куль (30-500 штук). Таке завдання виникає внаслідок того, що кулі з конструкційної кераміки мають високу стійкість і вартість. Тому замовляти великі партії прецизійних керамічних куль одного діаметра підприємствам в даний час економічно недоцільно. Обробка ж малих партій виключає можливість застосування елеваторної обробки. Відсутність елеватора, в якому кулі перемішуються випадковим чином, призводить до значного збільшення різнорозмірності куль в партії, яка нерідко в 10 і більше разів перевищує точність доведення [2]. При обробці великих партій куль, крім використання елеватора, є можливість відсортовувати оброблені кулі по групах одного діаметра з низькою різнорозмірністю куль в групі, як це робиться при обробці куль в підшипниковій промисловості [4].

З огляду на високу питому витрату алмазів при доведенні керамічних куль, а також значні величини припусків на обробку [20], найбільш

раціональна безперервна або періодична подача пасти [4]. Однак, внаслідок швидкого «забруднення» пасти продуктами зносу її абразивні властивості швидко знижуються, що значно збільшує питому витрату алмазів, особливо при обробці невеликих партій куль.

Закладка доводочної пасти безпосередньо в направляючу канавку дозволяє найбільш раціонально використовувати алмази при обробці малих і середніх партій куль. Максимальний обсяг пасти, який можна закласти безпосередньо в направляючу канавку, визначається профілем, висотою і формою канавки, а також залежить від діаметра оброблюваних куль.

Крім вищевикладеного, необхідно також враховувати, що більшість способів шліфування і доведення куль не дозволяє використовувати заготовки з самого початку великими відхиленнями від сферичної форми, а саме такими є спечені методами порошкової металургії заготовки куль з кераміки [25].

В результаті проведеного огляду та аналізу літературних джерел зроблено висновок, що існуючі в даний час методи обробки деталей типу "куля" практично непридатні для ефективної прецизійної обробки деталей з сучасної конструкційної кераміки.

При цьому класичний спосіб прецизійної обробки куль має ряд недоліків, які особливо сильно проявляються при обробці кераміки:

- низька продуктивність обробки внаслідок невисоких відносних швидкостей ковзання;
- одновісне обертання куль під час обробки і, як наслідок, - відсутність рівномірної сітки слідів обробки інструментом на обробленій поверхні;
- висока різнорозмірність оброблених куль по діаметру, особливо при обробці невеликих партій;
- великі відмінності умов обробки куль в канавках, розташованих на різних відстанях від центру диска і, як наслідок, на різних канавках процес протікає з різними якістю доведення, зносом інструменту і витратою доводочної пасти;

- низька стійкість доводочних дисків.

Слід зазначити, що основні недоліки відомих рішень прецизійної обробки куль, в тому числі керамічних, пов'язані, перш за все, з неможливістю реалізації раціональної кінематики обробки. При цьому в літературі питання, що стосуються аналізу кінематики руху куль в процесі обробки і забезпечення її оптимальності, висвітлені недостатньо повно, що істотно ускладнює здійснення високої продуктивності і точності обробки.

Кінематика процесу обробки визначається переважно її схемою. Тому обробку слід проводити за схемою, яка не має недоліків традиційної, яка перш за все дозволяє забезпечити високі швидкості ковзання між поверхнями куль і інструменту і створити умови для формування рівномірної сітки слідів обробки на поверхні кулі. При цьому для проектування інструменту, що забезпечує при даній схемі обробці оптимальну кінематику, необхідно розробити адекватну математичну модель кінематики прецизійної обробки куль, що встановлює зв'язок основних кінематичних параметрів з конструктивними характеристиками інструменту і режимними параметрами процесу. Це передбачає більш детальне дослідження кінематичних залежностей при прецизійній обробці куль методом обкатки, зокрема, визначення впливу на кінематику процесу зносу інструментів і сил тертя, що виникають в зонах їх контакту з робочою кулями.

У зв'язку з цим були визначені найбільш перспективні, на думку авторів [26], шляхи підвищення ефективності прецизійної алмазної обробки деталей типу "куля" з конструкційної кераміки:

1. На основі всебічного аналізу кінематичних схем процесів обробки деталей типу "куля" розробити схему обробки, що має переваги з точки зору прецизійної алмазної обробки куль з конструкційної кераміки [26].

2. На основі аналізу кінематики і закономірностей формування прецизійної сферичної поверхні при обробці куль методом обкатки розробити математичну модель кінематики прецизійної обробки куль з конструкційної кераміки [26].

3. За результатами математичного аналізу розрахувати геометричні характеристики інструментів, що забезпечують оптимальну кинематику процесу обробки керамічних куль [26].

4. Провести багатофакторні експериментальні дослідження показників прецизійної алмазної обробки куль з кераміки за запропонованою схемою, встановити їх зв'язок з режимними параметрами обробки і характеристиками доводочної пасти. На основі цього розробити рекомендації щодо ефективного застосування процесу прецизійної алмазної обробки куль з конструкційної кераміки в промисловості [26].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження впливу режиму обробки на процес алмазного доведення керамічних куль з гарячепресованого карбіду бору проводили на модернізованому доводочному верстаті мод. 3Е-814, в якому між верхнім і нижнім доводочними дисками було розміщено сепаратор (рис. 2.1.). Верхній диск не обертався. Частота обертання нижнього диска становила 30 об/хв. Кількість куль у партії, що оброблювалися одночасно, складала 15 шт. Використовували суспензію алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 28/20 на водній або масляній основі. Початкова підготовка куль до проведення дослідів – середній діаметр партії куль $D_{wL} = 42,97$ мм, середнє відхилення від сферичної форми куль у партії $\sigma = 2,1$ мкм, різнорозмірність діаметру куль у партії $VD_{wL} = 49$ мкм. Вказане значення середнього відхилення від сферичної форми куль у партії пояснюється тривалим доведенням куль суспензією алмазного мікропорошку АСМ зернистістю 14/10 на помірному режимі обробки.



Рис. 2.1 – Зовнішній вигляд верстату мод. 3E-814 (а) і його робоча зона (б).

Таблиця 2.1. Деякі фізико-механічні властивості керамічних матеріалів, отриманих методом гарячого пресування або реакційного спікання, їх ранжування за схильністю до тріщиноутворення [23].

Показник	Типи керамічних матеріалів				
	B4C (Гп)	ZrO2	Si3N4 (Гп)	Al2O3 (Гп)	SiC (Рс)
Густина, кг/м ³ ×10 ⁻⁶	2,48–2,52	5,95	3,10	3,90	3,12
Модуль пружності, ГПа	420–430	205	310	365	413
Мікротвердість Н _μ , ГПа	22,0–25,0	11,0	13,9	14,9	20,0
Індекс крихкості Н _μ /КІс	6,29–6,41	2,50	3,23	3,55	4,35
Критичний коефіцієнт інтенсивності напружень І типу КІс, Па*м ^{-1/2} ×10 ⁶	3,5–3,9	4,4	4,3	4,2	4,6
Ранжування за критичним значенням сили для утворення бічних тріщин у поверхневому шарі	0,05	1,00	0,45	0,32	0,18
Ранжування за критичною довжиною медіанної тріщини, при якому вона починає стало розвиватися при індентуванні	0,15	1,00	0,59	0,47	0,35

Вивчали вплив таких параметрів режиму обробки, як сила Р_д притиснення доводочного диску, час t_о обробки куль між подачами алмазної суспензії і основа алмазної суспензії (масло або вода) на швидкість знімання припуску $v_d = \Delta d/t$ (швидкість зменшення діаметру кулі), швидкість змінювання форми поверхні куль $v_{\square} = \Delta \square/t$ (швидкість зменшення або збільшення відхилення від сферичної форми) та швидкість змінювання різнорозмірності діаметру куль у партії Δdn . Вказані показники процесу обраховували після безпосереднього вимірювання на кожній кулі її діаметру і відхилення від сферичної форми до і після проведення дослідів.

Вимірювання діаметру кулі проводили на довгомірі вертикального типу ИЗВ-2 (рис. 2.2.) з ціною поділки шкали вимірювань 1 мкм. Діаметр кулі вимірювали у трьох взаємно перпендикулярних напрямках, причому вихідний напрямок вибирали довільно. На основі вимірювань обраховували середній діаметр кожної кулі D_{wm} (тут і далі позначення згідно ISO 3290-1:2014) і середній діаметр партії куль D_{wmL} до і після обробки. Значення



різномірності діаметру куль у партії VDwL визначали згідно стандарту як різницю між середніми діаметрами найбільшої й найменшої кулі у партії.

Рис. 2.2. Зовнішній вигляд довгоміра вертикального типу ИЗВ-2

Вимірювання відхилення від сферичної форми кулі ΔR_{Sw} (як радіальної відстані між найменшою описаною сферою й найбільшою вписаною сферою, центри яких співпадають – згідно стандарту) проводили за допомогою індикатору часового типу МИГ-1 (рис. 2.3) з ціною поділки шкали вимірювань 1 мкм, закріпленим на магнітному штативі. Вимірювану кулю розташовували на установочному кільці із внутрішньою фаскою, щоб максимально наблизитися до умов контакту кулі і кільця по окружності. Діаметр отвору кільця обирали як діаметр окружності, вписаної у рівносторонній трикутник, який у свою чергу є вписаним у окружність, діаметр якої дорівнює максимальному діаметру кулі. В результаті вимірювань при повороті кулі на установочному кільці знаходили

максимальне і мінімальне значення відхилення від сферичної форми кулі, різницю між якими вважали за відхилення від сферичної форми кулі ΔRSw , й



обраховували середнє відхилення від сферичної форми куль у партії □ до і після обробки.

Рис 2.3 Індикатору часового типу МИГ-1

Далі за обрахованими значеннями D_{wmL} , VD_{wL} й $\Delta RSwL$ (вихідними й після проведення дослідів) будували графіки змінювання цих характеристик у загальному часі проведення досліду у вигляді сукупності дискретних точок і виокремлювали саме вплив режиму обробки, який відбувається на фоні загальної тенденції до монотонного лінійного або нелінійного спадання цих показників від свого вихідного значення до рівня мінімально можливого значення за даної схеми доведення і даного часу обробки. Зазначена тенденція обумовлена на наш погляд, по-перше, поступовим переходом від обробки послабленого поверхневого шару як двошарової комбінації рельєфного і зруйнованого шарів до обробки саме основного матеріалу і пов'язаним з цим підвищенням фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, що призводить до зменшення окружної подачі доведення через саморегулювання кутової швидкості кочення кулі під дією сил тертя-зчеплення і різання. По-друге, вказана тенденція обумовлена одночасним монотонним збільшенням частки часу обробки саме основного матеріалу у загальному часі проведення досліду.

Для виокремлення впливу режиму обробки використали метод графічної апроксимації вказаних залежностей у вигляді сукупностей дискретних точок D_{wmL} , VD_{wL} й $\Delta RSwL$ монотонними безперервними функціями у часі [23]. Наслідком впливу режиму обробки у досліді вважали різницю між зміною обрахованого з досліду значення кожного показника (Δd , Δd_p й $\Delta \square$) і відповідною зміною значення апроксимаційної функції у цей момент загального часу обробки. За допомогою саме вказаної різниці обраховували швидкості змінювання показників під впливом режиму обробки в мкм/год.

Для вивчення змінюваності недетермінованих об'єктів – досліджуваних показників процесу – було вибрано повний факторний експеримент типу 2^3 , оскільки була відсутня кількісна оцінка степені впливу факторів. Матриця планування експерименту з урахуванням взаємодії факторів наведена у табл. 2. У табл. 2.2 дослід зі всіма факторами на нижніх рівнях позначено (1) як зазвичай це прийнято в літературі [24].

План експерименту передбачав варіювання всіх факторів на двох рівнях: сила притиснення доводочного диску P_d – 100 і 200 Н, час обробки куль між подачами суспензії t_o – 30 і 60 хв., основа алмазної суспензії – масло і вода. Час проведення кожного дослідів становив 6 годин.

Таблиця 2. 2 Матриця планування експерименту типу 2^3 у відносних величинах [24]

Номер дослідів	x_1	x_2	x_3	x_1 x_2	x_1 x_3	x_2 x_3	Буквені позначення рядків	y
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	(1)	y_1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	a	y_2
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	b	y_3
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	c	y_4
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	ab	y_5
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	ac	y_6

7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	bc	y7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	abc	y8

За отриманими результатами дослідів будували лінійні моделі досліджуваних показників процесу від факторів, що варіюються, з урахуванням взаємодії факторів у вигляді:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{k+1}x_1x_2 + \dots + b_{2k}x_k-1x_k,$$

в якій коефіцієнти моделі розраховуються за формулами за наступними формулами:

$$b_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ji} Y_i, j = \overline{0, k}$$

$$b_{j+k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ji} X_{(j+1)i} + X_{ji} X_{(j+2)i}) Y_i, j = \overline{1, k}$$

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Згідно з рекомендаціями статистичної обробки даних [24], під час обрахунку середніх значень показників, що вимірювалися – діаметру і відхилення від сферичної форми куль, серед останніх не знайдено з довірчою імовірністю 0,95 результатів, що різко виділяються серед інших. Перевірка дисперсій вибірок за критерієм Кохрена показала, що вони є однорідними. Тоді найкращою оцінкою дисперсії відтворюваності буде середньозважена дисперсія:

$$S_{\text{відтв}}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{\text{відтв}i}^2$$

Оскільки досліджувані показники процесу доведення є розрахунковими величинами, які базуються кожного разу на вимірюванні вказаних у методиці досліджень геометричних показників, дисперсію відтворюваності для них обраховували як середньозважену дисперсію дисперсій вибірок, приведену до розмірності розрахункової величини (тобто мкм/год):

$$S_{\text{відтв}i}^2 = \frac{1}{km} \sum_{i=1}^m S_i^2,$$

де $k = 36$. Значення дисперсій відтворюваності наведено у підсумковій табл. 5.

Як видно з рис. 5, змінювання діаметру кулі в залежності від часу обробки t є монотонно спадаючим і його доцільно апроксимувати лінійною функцією. В той же час залежність відхилення від сферичної форми є монотонно зростаючою, а різнорозмірності діаметру партії куль – монотонно спадаючою, але їх доцільно апроксимувати нелінійними функціями (в обох випадках – другого порядку). Монотонне зростання відхилення від сферичної форми куль у часі пояснюється використанням у дослідях алмазної суспензії

підвищеної зернистості і більш жорстким режимом обробки у порівнянні з початковою підготовкою куль.

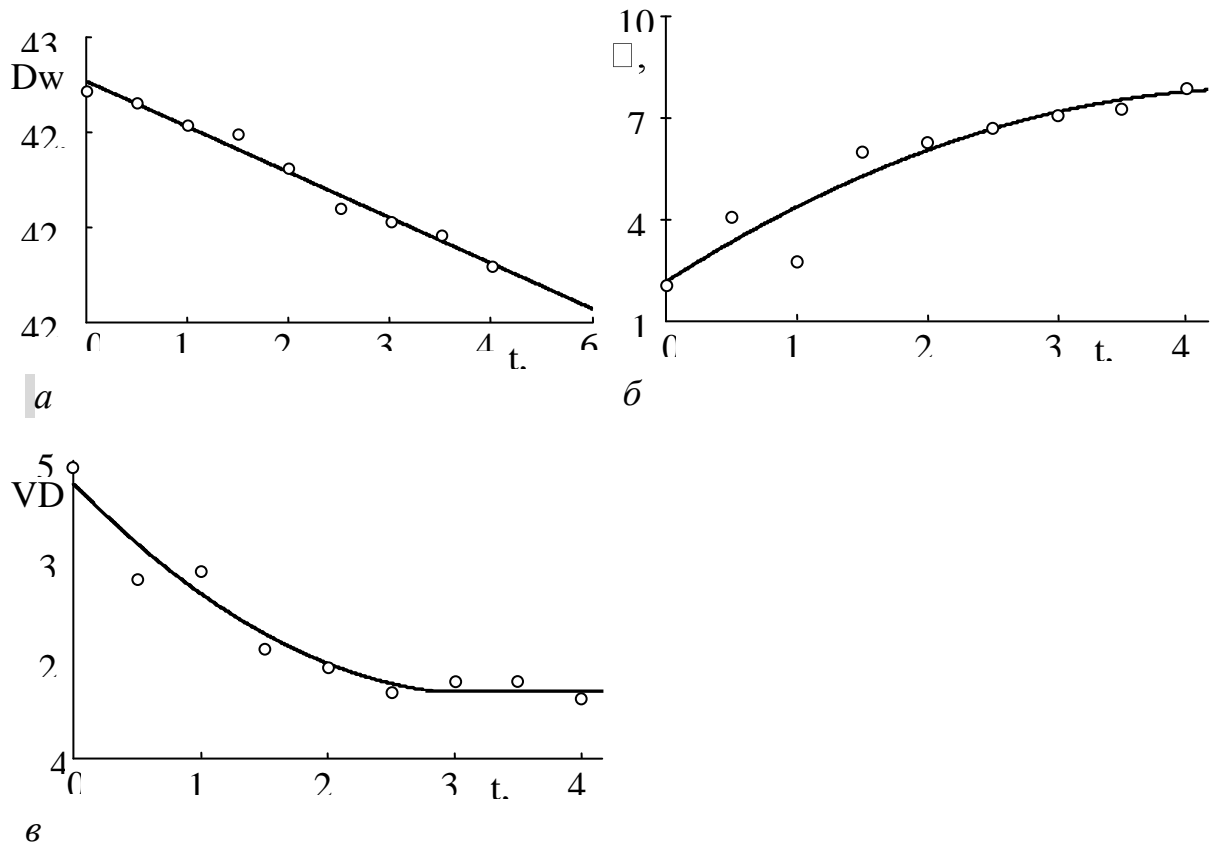


Рис. 5. а) змінювання середнього діаметру партії куль D_{wmL} , б) середнього відхилення від сферичної форми куль у партії \square , в) різномірності діаметру куль у партії VD_{wL}

Для визначення тієї складової вищевказаних показників процесу, змінювання якої не залежить від впливу режиму обробки, застосовано метод графічної апроксимації. Додатне чи від'ємне значення цієї складової Δd , Δdn й $\Delta \square$ отримуємо згідно з вищеописаною методикою в результаті віднімання апроксимованого значення від його поточного значення у досліді (табл. 3).

Від'ємне значення поточного значення у досліді означає, що вимірюваний показник в результаті проведення досліді збільшується, відповідно додатне значення різниці між поточним і апроксимованим значеннями означає, що вплив режиму обробки призводить до зменшення

поточного значення вимірюваного у досліді показника відносно апроксимованого значення. В табл. 3.1 наведені розраховані таким чином значення швидкості зменшення діаметру, швидкості змінювання відхилення від сферичної форми й швидкості змінювання різнорозмірності діаметру куль у партії під дією режиму обробки.

За наведеними результатами побудовано лінійні моделі досліджуваних показників процесу з урахуванням взаємодії факторів, що варіюються, у нормованому вигляді:

$$v_d = -0,1250 - 0,0417x_1 + 0,0417x_2 + 0,2083x_3 + 0,2917x_1x_2 - 0,2083x_1x_3 - 0,2083x_2x_3 + 0,7083x_1x_2x_3;$$

$$v_{\square} = -0,0704 + 0,0096x_1 - 0,1679x_2 + 0,1017x_3 - 0,1038x_1x_2 - 0,0625x_1x_3 + 0,1042x_2x_3 + 0,0625x_1x_2x_3;$$

$$v_{\Delta d} = 0,0475 - 0,5613x_1 + 0,2479x_2 - 0,0538x_3 + 0,2567x_1x_2 + 0,5067x_1x_3 - 0,0750x_2x_3 - 0,0354x_1x_2x_3.$$

Таблиця 3.1 Матриця змінювання факторів, що варіюються, у абсолютних величинах, значення досліджуваних показників процесу

Номер досліду	Сила притиснення до диску Рд, Н	Час обробки куль між подачами суспензії to, год	Основа алмазної суспензії	Зменшення діаметру куль Δd , мкм			Швидкість зменшення діаметру v_d , мкм/год	Зміна відхилення від сферичної форми куль $\Delta \square$, мкм			Швидкість змінювання відхилення від сферичної форми $v \square$, мкм/год	Зміна різномірності діаметру куль у партії Δd_p , мкм			Швидкість змінювання різномірності $v \Delta d$, мкм/год
				з досліду	апрокс.	від впливу режиму		з досліду	апрокс.	від впливу режиму		з досліду	апрокс.	від впливу режиму	
1	100	1,0	масло	5	12	-7	-1,2	-2	-1,17	-0,83	-0,14	17	10,17	6,83	1,14
2	200	1,0	масло	12	12	0	0,0	1	-1,03	2,03	0,34	-1	8,49	-9,49	-1,58
3	100	0,5	масло	13	12	1	0,2	-3	-0,90	-2,10	-0,35	14	6,80	7,20	1,20
4	200	0,5	масло	10	12	-2	-0,3	-4	-0,77	-3,23	-0,54	3	5,11	-2,11	-0,35
5	100	1,0	вода	21	12	9	1,5	0	-0,64	0,64	0,11	4	3,42	0,58	0,10
6	200	1,0	вода	6	12	-6	-1,0	0	-0,50	0,50	0,08	-1	1,73	-2,73	-0,46
7	100	0,5	вода	7	12	-5	-0,8	0	-0,37	0,37	0,06	0	0	0	-0,00
8	200	0,5	вода	16	12	4	0,7	-1	-0,24	-0,76	-0,13	2	0	2	0,33

Статистичну значимість коефіцієнтів рівнянь регресії перевіряли за критерієм Стюдента за умовою виконання нерівності

$$t_j = \frac{|b_j|}{S(b_j)} > t_p(f),$$

де $S(b_j) = S(\bar{y})/\sqrt{N}$ – середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів, $t_p(f)$ – табличне значення критерію Стюдента за $p = 95\%$ і числа ступенів свободи $f = N(m - 1)$. Якщо нерівність виконується, коефіцієнт значимо відрізняється від нуля.

Результат перевірки статистичної значимості коефіцієнтів рівнянь регресії: показника v_d – 5 статистично значимих коефіцієнтів (крім b_1 і b_2), показника v_{\square} – 4 статистично значимі коефіцієнти (крім b_1 , b_5 і b_7) і показника $v_{\Delta d}$ – 1 статистично значимий коефіцієнт (b_5).

Для перевірки адекватності отриманих рівнянь регресії експериментальним результатам за критерієм Фішера спочатку розраховували дисперсію адекватності результатів розрахунку по моделям

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{N-l} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2,$$

де \hat{y}_i – результат розрахунку величини по моделі, l – число значимих коефіцієнтів рівнянь регресії. Рівняння регресії є адекватними експериментальним результатам, якщо виконується умова

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{відтв}^2} \leq F_{1-p}(f_{ад}, f_{відтв})$$

де $F_{1-p}(f_{ад}, f_{відтв})$ – табличне значення критерію Фішера для $p = 0,05$ і чисел ступенів свободи $f_{ад} = (N - l)$, $f_{відтв} = N(m - 1)$. Оскільки для отриманих рівнянь регресії вищенаведена умова за критерієм Фішера виконується, зроблено висновок про адекватність рівнянь регресії експериментальним результатам (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 Розрахунок статистичних величин для перевірки адекватності рівнянь регресії експериментальним результатам

Показник	vd	v□	VΔd
Дисперсія відтворюваності $S_{\text{відтв}}^2$, мкм2	1,053	0,302	2,253
Дисперсія адекватності $S_{\text{ад}}^2$, мкм2/год2	0,139	0,237	2,350
Розрахований F-критерій Фішера $f = S_{\text{ад}}^2 / S_{\text{відтв}}^2$	0,132	0,786	1,043
Табличний F-критерій Фішера для $p = 0,05$ і чисел ступенів свободи $f_{\text{ад}} = (N - 1)$, $f_{\text{відтв}} = N(m - 1)$	2,690 ($f_{\text{ад}} = 3$, $f_{\text{відтв}} = 112$)	2,450 ($f_{\text{ад}} = 4$, $f_{\text{відтв}} = 112$)	2,180 ($f_{\text{ад}} = 6$, $f_{\text{відтв}} = 112$)

З урахуванням результатів перевірки маємо наступні моделі змінних процесу, адекватні вихідним даним:

$$vd = -0,1250 + 0,2083x_3 + 0,2917x_1x_2 - 0,2083x_1x_3 - 0,2083x_2x_3 + 0,7083x_1x_2x_3;$$

$$v\Box = -0,0704 - 0,1679x_2 + 0,1017x_3 - 0,1038x_1x_2 + 0,1042x_2x_3;$$

$$v\Delta d = 0,0475 - 0,5613x_1 + 0,5067x_1x_3.$$

РОЗДІЛ 4. ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Як видно з отриманих рівнянь регресії, вплив взаємодії факторів для кожного з досліджуваних показників процесу є не меншим за вплив саме досліджуваних факторів, тобто вказані рівняння регресії не є лінійними залежностями від досліджуваних факторів. Найбільший вплив на швидкість v_d чинить взаємодія всіх трьох факторів – її вплив є в 2,4–3,4 рази суттєвішим за інші. Відносно більший вплив (у 1,5 рази у порівнянні із впливом основи алмазної суспензії, взаємодії факторів) на швидкість v_{\square} має час t_0 , на швидкість $v_{\Delta d}$ (у 1,4 рази у порівнянні із впливом сили P_d) – взаємодія сили P_d і основи алмазної суспензії.

Прямий вплив сили P_d не спостерігається у рівняннях регресії v_d і v_{\square} – наявний лише опосередкований його вплив через взаємодію факторів. Прямий і опосередкований вплив часу t_0 на швидкість $v_{\Delta d}$ є відсутнім. Прямий вплив часу t_0 на швидкість v_d відсутній, наявний лише опосередкований вплив. Прямий вплив основи алмазної суспензії на швидкість $v_{\Delta d}$ відсутній (наявний лише опосередкований), а його вплив на v_d і v_{Δ} є практично на рівні впливу інших факторів.

Оскільки стратегічною метою процесу алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору є в першу чергу максимально можливе виправлення відхилення від сферичної форми куль і різнорозмірності діаметру куль у партії, а лише в другу чергу досягнення прийнятної продуктивності обробки, саме з такої точки зору слід визначати вплив режиму обробки на показники алмазного доведення керамічних куль. У табл. 6 наведені значення досліджуваних показників процесу, розраховані за отриманими моделями, позначено позитивний (+) або негативний (–) результат впливу режимів обробки на виправлення відхилення від сферичної форми куль.

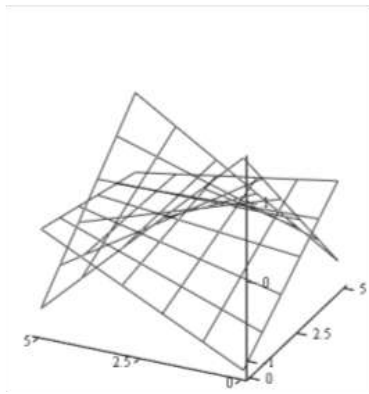
Таблиця 4.1 Значення досліджуваних показників процесу, розраховані за моделями

№ з/п	Сила притиснення доводчого диску Р _д , Н	Час обробки куль між подачами суспензії t _о , год	Основа алмазної суспензії	Швидкість зменшення діаметру кулі v _d , мкм/год	Швидкість змінювання форми поверхні кулі v _□ , мкм/год	Швидкість змінювання різнорозмірності v _{Δd} , мкм/год	Позначення позитивного (+) і негативного (-) результатів
1	100	1,0	вода	-1,2	-0,0	1,12	-
2	200	1,0	вода	0,1	0,2	-1,02	+
3	100	0,5	вода	0,1	-0,3	1,12	-
4	200	0,5	вода	-0,3	-0,5	-1,02	-
5	100	1,0	масло	1,5	-0,0	0,10	-
6	200	1,0	масло	-0,9	0,2	-0,01	+
7	100	0,5	масло	-0,9	0,1	0,10	++
8	200	0,5	масло	0,7	-0,1	-0,01	-

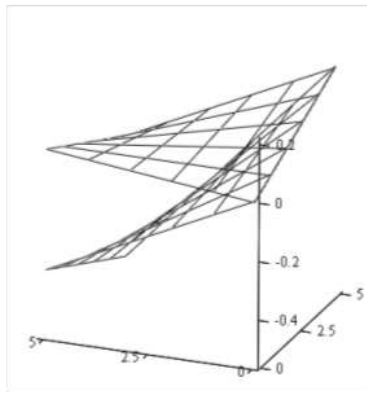
Як видно з табл. 4.1 і рис. 4.1, позитивний результат, а саме: забезпечення максимального додатного значення показника v_□, досягається зі підвищенням сили притиснення зі 100Н до 200Н, і тим кращий, якщо збільшувати час між подачами суспензії за будь-якої основи алмазної суспензії (рис. 7, б). За такого режиму обробки виправлення відхилення від сферичної форми куль має здійснюватися з максимальною швидкістю.

Однак для одночасного забезпечення додатного значення показників v_□ і v_{Δd}, тобто одночасного зменшення і відхилення від сферичної форми куль, і різнорозмірності діаметру куль у партії, слід зменшувати силу притиснення до 100Н і час між подачами суспензії до 30 хвилин за обов'язкового використання алмазної суспензії на основі масла.

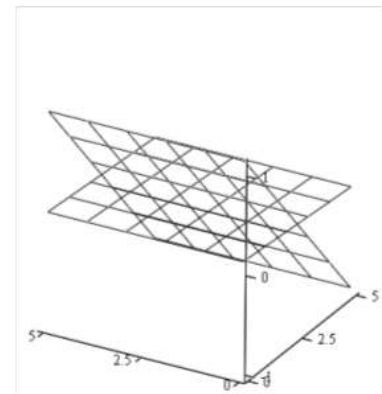
З позиції забезпечення прийнятної продуктивності процесу слід відзначити незначний вплив режимних параметрів на величину зменшення діаметру куль.



а)



б)



в)

Рис. 4.1 Залежності показників v_d , v_{\square} і $v_{\Delta d}$ від сили P_d й часу обробки t_0 за основи алмазної суспензії: вода (1) й масло (2).

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

Метою даного розділу є проведення аналізу стартап-проекту для визначення принципової можливості його впровадження на ринок та можливих напрямків реалізації цього впровадження.

5.1. Опис ідеї проекту

У цьому розділі буде описаний стартап-проект, який базуватиметься на отриманих раніше результатах, а виготовлення гібридних підшипників з кераміки які будуть використовуватися в газо-турбінних двигунах.

У таблиці 5.1 подано інформацію, яка дає цілісне уявлення про зміст ідеї, можливі потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів та вигоди для користувача.

Таблиця 5.1- Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки користування	Вигода для користувача
- Виготовлення гібридних підшипників з кераміки	Газотурбінні двигуни які в свою чергу повсюдно використовуються в машинобудуванні, авіації тощо	- Збільшена потужність двигунів при незмінюваних розмірів (за рахунок збільшених швидкостей роботи)

Таблиця 5.2- Аналіз техніко-економічних переваг даної ідеї

	Мій проект	Стандартний підшипник
Виготовлення	Власна розробка технологічного процесу, що позбавить плати за патент	Використання патенту
Матеріал	Високо вартісна кераміка з карбіду бору	Низько вартісна сталь

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Після того як було проведено аудит технології, за допомогою якого можна реалізувати ідею проекту, можна визначити технологічність здійсненності ідеї проекту(табл. 5.3).

Таблиця 5.3- Технологічна здійсненність ідеї проекту.

Ідея проекту	Наявність технологій	Доступність технологій
Виготовлення гібридних підшипників з кераміки для газотурбінних двигунів	Виготовлення підшипників на модернізованому верстаті	Верстат та деталі для модернізування доступні на ринку
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: алмазне доведення		

За результатами можна зробити висновок, що технічна реалізація проекту можлива.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначивши ринкові можливості, їх можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, що дозволить спланувати напрямки

розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Аналіз попиту показав, що на ринку доступні гібридні підшипники з кераміки, але доступність виготовлення відстають від нашої, тому за попереднім оцінюванням проект є привабливим для входження. За результатами аналізу можна зробити висновок, щодо можливості роботи на ринку з огляду на відсутність таких унікальних характеристик у конкурентів. Також слід відзначити зростаючу динаміку ринку, так як вимоги до газотурбінних двигунів зростають, а значить і вимоги до якості і кількості виготовлення підшипників теж. Обмеженням для виходу на ринок є наявність суворих вимог до стандартизації та сертифікації виробів.

Визначення потенційних груп клієнтів, їх характеристики, та формування орієнтовного переліку вимог до товару для кожної групи (табл. 5.4)

Таблиця 5.4- Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Вимоги споживачів до товару
Підвищення технічних характеристик підшипників	Газо-турбінні двигуни для машинобудування, авіації тощо.	-Надійність -Зносостійкість -Робота в наджорстоких умовах

Після визначення потенційних груп клієнтів проведено аналіз ринкового середовища: складено таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл 5.5-5.6)

Таблиця 5.5 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Вартість	Вища вартість ніж у металевих гібридних підшипників	Відмова від використання
2	Складність обладнання	Складніше для налаштування обладнання у порівнянні зі стандартними гібридними підшипниками	Відмова від використання

Таблиця 5.6 -Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Підвищення потужності газотурбінних двигунів	Можливість використовувати двигуни в складних умовах	Перехід на використання гібридних підшипників з кераміки

Надалі проведено аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.7).

Таблиця 5.7- Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
Вказати тип конкуренції	Чиста	Акцент на унікальних характеристиках товару
За рівнем конкурентної боротьби	Міжнародна	Продуманий маркетинг та зв'язки з виробництвами
За галузевою ознакою	Внутрішньогалузева	Акцент на унікальних характеристиках товару
Конкуренція за видами товарів	Товарно-родова	Конкуренція між різними видами товарів, які можуть виконувати подібні функції
За характером конкурентних переваг	Нецінова	Головною конкурентною перевагою є підвищення потужності газо-турбінних двигунів

Проведення більш детального аналізу умов конкуренції в галузі за моделлю 5 сил М. Портера є недоречним, оскільки в даного проекту немає конкурентів, постачальників, товарів-замінників та клієнтів, тому що він ще на стадії розробки. Так як аналогів проекту ще не створено немає необхідності аналізувати перелік факторів конкурентоспроможності та сильні і слабкі сторони стартап-проекту в порівнянні з товарами-конкурентів.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.8).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 5.8- SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><i>Сильні сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Унікальність виготовлення - Підвищення потужності двигунів - Інноваційність технології - Супроводження проекту, введення і підтримка на всіх етапах реалізації. 	<p><i>Слабкі сторони:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Складніше виробництво - Вища ціна
<p><i>Можливості:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Можливість збільшення обсягів продаж за рахунок заключення спеціальних контрактів; - Отримання фінансування від зацікавлених концернів. 	<p><i>Загрози:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Конкуренція на ринку - Ненадійність продукту

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів.

Так як цільових аудиторій декілька: машинобудування, авіація ракетобудування тощо, то стратегія охоплення ринку – стратегія диференційованого маркетингу, так як компанія зосереджується на декількох сегментах.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.9)

Таблиця 5.9- Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова Стратегія розвитку
Розвиток ринку	Масовий маркетинг	Низькі витрати створюють бар'єр входу для нових конкурентів і одночасно хороший захист проти товарів-замінників. Можливість досягнення ефекту масштабу і досвіду.	Стратегія лідерства по витратах
Розвиток ідеї	Диференційований маркетинг	Відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів-замінників. Підвищена рентабельність збільшує стійкість до можливого зростання витрат в результаті дії сильного постачальника.	Стратегія диференційованості

На основі таблиці 5.9 обрана базова стратегія розвитку – стратегія диференційованості. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.10.)

Таблиця 5.10- Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопроходцем» на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або Забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки
Так	Так	Ні	Стратегія лідера
Ні	Так	Ні	Стратегія виклику лідера
Ні	Ні	Так	Стратегія наслідування лідеру
Так	Ні	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

На основі таблиці 5.10 стратегія конкурентної поведінки- стратегія виклику лідера.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку розробляється стратегія позиціонування (таблиця 5.11), що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельний проект.

Таблиця 5.11 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
-Підвищення потужності двигунів -Надійність -Зносостійкість	Стратегія диференційованості	-Унікальна технологія виготовлення. - Підвищені характеристики якості	Унікальність, якість, зносостійкість, надійність

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару. Він говорить нам про те, що ключовою перевагою нашого продукту є унікальна технологія виготовлення та підвищення характеристик якості яка задовольняє потребу підприємств в підвищенні якості виготовлення газо-турбінних двигунів.

Надалі розроблено трирівневу маркетингову модель товару: уточнюється ідея продукту/послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12- Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
Товар за задумом	Гібридний підшипник з кераміки для газо-турбінних двигунів
Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики: якісний гібридний підшипник з кераміки

	Якість: стандарти і сертифікація підшипників
Товар із підкріпленням	Тренінги з користування, якісний пост-продажний сервіс
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Патент.	

Визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар є недоцільним, оскільки остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту, наявності повної інформації та готового технічного рішення для виготовлення.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якої приймається рішення (таблиця 5.13):

- збут буде проводитись власними силами, тобто буде реалізовано власну систему збуту;
- оптимальна глибина каналу збуту: канал збуту нульового рівня (виробник сам продає товар кінцевому споживачеві).

Таблиця 5.13- Формування систем збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Характерно для промисловості малими або середніми серіями, який може бути придбаний необмеженим числом споживачів	Просування на ринок подібного продукту в рамках даної системи збуту вимагає широкої реклами	Канал нульового рівня	Канал складається з виробника, який продає свій товар безпосередньо споживачам (через відділ збуту, мережу фірмових магазинів, тощо)

Останньою складової маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 5.14).

Таблиця 5.14- Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Характерно для промисловості малими або середніми серіями, який може бути придбаний необмеженим числом споживачів	Включають в себе пряму поштову розсилку, продаж в режимі онлайн	Конкурентне позиціонування, яке базується на Демонстрації переваг товарів Підприємства над товарами конкурентів.	Отримати можливість у кілька разів Збільшити обсяг продажу своїх товарів	Головними елементами структури реклами є тема реклами і девіз рекламної кампанії

5.6 Висновки розділу

У ході розробки стартап-проекту було проаналізовано можливості ринкової комерціалізації проекту. За результатами аналізу було виявлено, що технологічна реалізація проекту можлива, визначені його сильні та слабкі сторони, напрямки впровадження, вигоди для користувача.

Даний ринок є привабливим для входження через унікальність технології виготовлення та підвищених якостей. З огляду на потенційні групи клієнтів, суттєвих бар'єрів входу на ринок не виявлено, через унікальність технології, оскільки аналогів ще не створено.

Даний проект можна вважати перспективним для впровадження та є доцільною подальша його імплементація.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті експериментального дослідження впливу режиму обробки на показники алмазного доведення керамічних куль з карбіду бору визначене найбільш ефективне з точки зору одночасного зменшення і відхилення від сферичної форми куль, і різнорозмірності діаметру куль у партії поєднання досліджуваних факторів, а саме: зменшення значення сили притиснення до 100Н і часу між подачами суспензії до 30 хвилин за обов'язкового використання алмазної суспензії на основі масла.

Забезпечення максимального додатного значення показника v_{\square} , досягається зі підвищенням сили притиснення зі 100Н до 200Н, і тим кращий, якщо збільшувати час між подачами суспензії за будь-якої основи алмазної суспензії

З позиції забезпечення прийнятної продуктивності процесу обробки слід відзначити незначний вплив режимних параметрів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении: Учебное пособие / Под ред. А. И. Грабченко. — Харьков: ХГПУ, 1999 г. — 436 с.
- [2] Сакулевич Ф. Ю., Минин Л.К., Олендер Л.А. Магнитно-абразивная обработка точных деталей. — Минск: Вышейш. Школа, 1977. — С.213-268
- [3] Филонов И. П. Механика процессов обкатки / Под ред. П. И. Ящерицына. — Минск: Наука и техника, 1985. — 328 с.
- [4] Спицын Н. А., Спришевский А.И. Подшипники качения. — М.: Машиностроение, 1969. — 583 с.
- [5] Г. Задорогин Е.П. Доводка шариков высших степеней точности // Автомобильная промышленность. — 1987. — № 3. — С. 27-28.
- [6] Способ обработки шариков: А.с. 1252138 СССР, МКИ⁵ В 24 24 11/02/ И.П. Филонов, И. И. Дьяков, А. Х. Букенгольц, Жохов А.А. — № 3813168/25-08; Заявлено 19.11.84; опубл. 13.10.86, Бюл. №31. — 3с.
- [7] Способ управления процессом элеваторной обработки шариков; А.с. 1247240 СССР, МКИ В 23 О 15/00 / И.П. Филонов, А. Х. Букенгольц, Г.И. Гульков, (СССР). — № 3823085/25-08; Заявлено 11.12.84; Опубл. 17.2.86, Бюл. № 28. — 3 с.
- [8] Способ чистовой обработки шаров: А. с. 1247248 СССР, МКИ В 24 В 39/00 / А. И. Яновский, Б. Г. Резников, (СССР)— № 2835894/25-08; Заявлено 6.11.79; 29.12.80, Бюл. №28. — 4 с.
- [9] Устройство для алмазного выглаживания шаров: А. с. 1247251 СССР, МКИ В 24 В 39/04 / А.Н. Резников, Б.Г. Яновский, (СССР). — № 2841090/25-08; Заявлено 19.11.79; Опубл. 29.12.80, Бюл. №28. — 4 с.
- [10] Олендер Л. А. Технология и оборудование шарикового производства. — Минск: Вышэйш. школа, 1974. — 115 с.
- [11] Ящерыцин П.И., Олендер Л.А., Грек С.В. Доводка шариков, -Минск: Наука и техника, 1968 г.-С.36
- [12] Клебанов М. К., Малахов А. Ф., Шабанов Л. А. Новый метод доводки шариков подшипников // Станки и инструмент. — 1975. — № 10. — С. 28-30.

- [13] Ящерицин И.И. Методы повышения качества обработки деталей при полировании и доводке. Минск; ИНТИП, 1960, 78 с.
- [14] Новые отечественные станки для окончательной доводки шариков: Обзор / Фейгин Р. Н., Леоненко И. Д., Кухаренко В. Т., Дисон Б. Д., Миронов Б. А. — М: НИИмаш, 1980. — 28 с.
- [15] Ящерицын П. И., Олендер Л.А., Д., Климович В, М. Теоретический анализ кинематики движения шариков в процессе доводки // Известия АН БССР»: Серия физико-технических наук, 1973, № 3. — С. 63-68.
- [16] Заявка № 88.А от 15.01.93, МКИ⁵ И 24 И 13/00. Способ обработки сферических поверхностей I А. С. Козерук, И. П. Филонов, В. И. Чембрович и др. (РБ) — 30.09.94. Официальный бюллетень патентного ведомства Республики Беларусь, № 2. — с. 9
- [17] Редько С. Г., Сивяков К. М. Некоторые результаты экспериментального исследования нового способа доводки тел качения шариковых подшипников // Труды Саратовского Политехнического института. — 1971. — вып. 51. — С. 36-39.
- [18] Задорогин Е.П. Способ доводки шариков // Вестник машиностроения. — 1987.—Ч6. — С. 56-58.
- [19] Заявка № 231.А от 01.04,93. МКИ5 И 24 И 13/00. Станок для обработки шариков А. С. Козерук, И. П. Филонов, В. И. Чембрович и др, (РБ) — 30.09.94. Официальный бюллетень патентного ведомства Республики Беларусь, № 2, с. 10.
- [20] Исследование закономерности прецизионной алмазной обработки износо- и коррозионостойкой керамики: Отчет по теме 1.6.7.1840 / ИСМ, лаб. 18/1 технологии шлифования композиционных и инструментальных материалов; № ГР 0100Ш06211; Инв. № 2129297. — К., 1994. — 98 с.
- [21] Орлов П, Н, Иногматов Т.Т., Наумов В. А, Влияние конструкции инструмента на качество доводки шариков // Станки и инструмент. -1972. - №3.-С.17-20

- [22] Орлов П, Н., Сагателян Г.Р., (Доводка труднообрабатываемых материалов свободным швом с наложением ультразвуковых колебаний М Машиностроение, 1983. — 81 с.
- [23] Вплив режиму обробки на показники алмазного шліфування керамічних куль з карбїду кремнію / С. В. Сохань, А. Л. Майстренко, В. Г. Сороченко, В. В. Возний, В. Г. Кулич, М. П. Гаманюк, Є. М. Зубанев / Сверхтв. материалы, – 2019. – № 1. – С. 18-35.
- [24] Кононюк А.Е. Основы научных исследований (Общая теория эксперимента). В 4-х кн. Том 2. – Киев, Изд-во «КНТ», 2011. – 453 с.
- [25] Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / под. ред. В. Шатта. — М.: Металлургия, 1983. — 520 с.
- [26] Пасічний О. О. Підвищення ефективності прецизійної алмазної обробки деталей типу “куля” з конструкційної кераміки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Київ, 2002. — 22 с.
- [27] Тихоновський А.К., Федько В.О., Сохань С.В. Особливості алмазного шліфування керамічних куль // Інновації молоді в машинобудуванні: Збірка праць Міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених та студентів / за заг. ред. Данильченка Ю.М., д-ра техн. наук., проф. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — № 1. — 443 с. — С. 387-392.